

文章编号: 1001-1455(2000)02-0137-06

# 丙烷-空气爆燃波的火焰面 在直管道中的加速运动

周凯元, 李宗芬

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 对丙烷-空气爆燃波的火焰面(以下简称爆燃火焰)在直管道中加速运动的规律及其影响因素作了初步实验研究, 包括爆燃火焰在光滑内壁管道中的传播状况; 管道直径和点火能量的变化以及当管道内有障碍物时对火焰加速度的影响。以上研究也涉及了非稳定爆轰波的火焰面在直管道中的加速运动。根据这一研究结果, 对目前按常规设计和使用的工业管道阻火器的安全性和可靠性提出了质疑。

关键词: 丙烷; 爆燃波; 加速; 管道阻火器; 工业安全

中图分类号: O381 文献标识码: A

## 1 引言

在工业上广泛使用管道阻火器来阻止非正常爆燃或爆轰火焰在输运可燃气体的管道网中传播, 遏制爆炸事故的发生, 保护工业设备安全。每一台管道阻火器的主要性能参数是其额定安全阻火速度值, 当管道中的爆燃或爆轰火焰传播速度超过这一额定值时, 阻火器有可能失去其阻火功能, 这是十分危险的。按照传统的观点, 例如英国标准 BS7244 给出的阻火器试验方法和试验程序<sup>[1]</sup>中所述, 当管道中可燃气体种类和气体压力确定后, 阻火器额定阻火速度值仅仅取决于阻火器的位置到可能的回火(或点火)处的最大距离。这个距离就是火焰加速段长度, 简称点火距离。我国的国家标准 GB13347-92<sup>[2]</sup>也是仿照这个观点规定的, 其理由是较长的点火距离会产生较大的火焰速度。Watson<sup>[3]</sup>所给出的在不同直径的直管道中火焰速度与点火距离的关系曲线证明了这一点, 该结果一直被用于确定管道阻火器的额定阻火速度值。

近年来的研究<sup>[4]</sup>表明, 气体爆燃和非稳定爆轰波的火焰面(以下简称非稳定爆轰火焰)在管道中的加速运动受到许多其它条件的影响。例如当管道内壁被腐蚀出现呈排列状的凸起物或其它污染物的情况下, 与一个具有光滑内壁的新管道相比, 火焰加速过程要快得多。这对于按理想状况下设计和安装的阻火器而言显然是不安全的。

因此, 我们对气体爆燃及非稳定爆轰火焰在直管道中加速运动以及点火能量和管径对火焰加速度的影响进行了实验研究, 同时对管内有障碍物时的火焰加速运动作了初步研究。

## 2 实验装置

实验是在内径为50mm和100mm的两个激波管中进行的, 管道内壁未作加工处理, 但比

\* 收稿日期: 1999-06-07; 修订日期: 1999-09-14  
作者简介: 周凯元(1945—), 男, 副教授。

较光滑无锈斑,图 1 是实验装置简图。 $\phi 50\text{mm}$  激波管全长为 18m,  $\phi 100\text{mm}$  激波管全长为 24m。管道壁上设置了多个光电传感器探测孔用于火焰速度的测量。采用静态分压配气法在混气罐中进行丙烷气与空气的混合,这种方法比流量配气法<sup>[5]</sup>程序复杂,费时费事,但混合精确度高,降低了多次重复实验时因配气成分偏差造成的实验误差。采用电火花点火,名义点火能量可在 1~32J 之间连续调节。火花塞设在管端部,点火端可以是封闭的也可以是开启的,分别称为闭端点火和开端点火,如图 2 所示。闭端点火时管道尾端是开启的,不设任何薄膜,这是为了防止在实验时管道尾端的薄膜对气流产生阻塞从而影响火焰加速度。实验介质采用 4.03% 的丙烷-空气预混气,初始充气压力为 0.1MPa。由于起爆时管的一端与大气相通,因此点火时的初始预混气压力等于外界大气压。

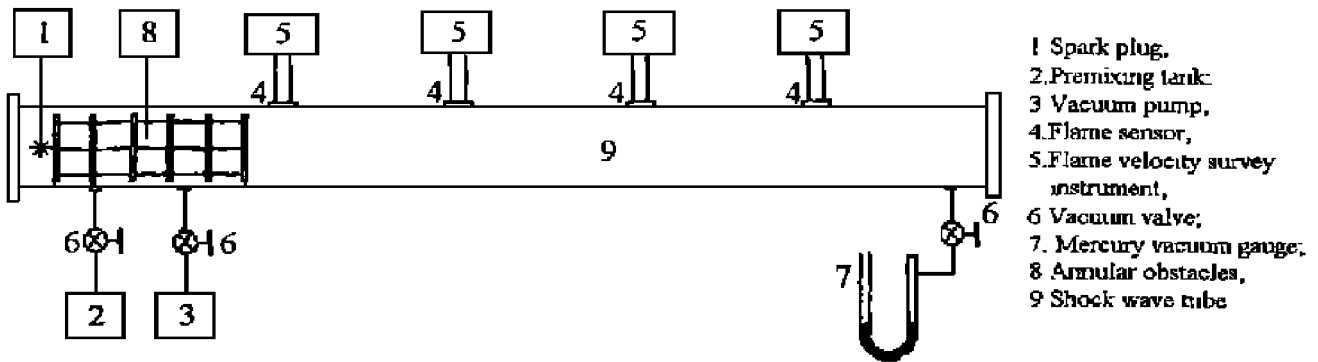


图 1 实验装置简图

Fig.1 Experimental set-up

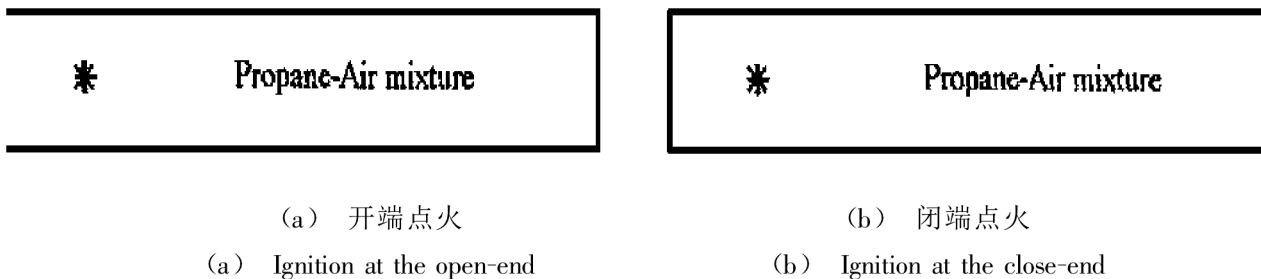


图 2 开端点火与闭端点火示意图 (\* 火花塞)

Fig.2 The schematic of open or close-end ignition (\* spark plug)

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 不同管径直管道中的火焰加速实验

实验在内径为 50mm 和 100mm 两个激波管中分别进行,每个激波管实验又分别采用开端点火与闭端点火两种方式。实验结果如图 3 和图 4 所示。图中每一个实验点都是多次实验数据的算术平均值。

从这两个图我们可以看到,在光滑内壁的管道中,开端点火只能获得很小的火焰加速度。例如在  $\phi 50\text{mm}$  管中,当点火距离为 6m 时,火焰速度仅为 12.5m/s,而点火距离为 16m 时,火焰速度为 34m/s。在同样的点火距离下,闭端点火比开端点火时的火焰速度大得多,例如点火距离为 16m 时,火焰速度为 240m/s。比开端点火时大 7 倍。这一实验结果很容易用产物从开端飞散以及稀疏波传入未反应区而得到解释。另外,从图 3 和图 4 还可以看到,不论用什么点火

方式,在管道中火焰速度的增长用双对数坐标表示大致呈现出线性特征,这个特征仅表现在点火距离为2~20m左右的范围内。更趋近于点火处的火焰加速情况没有包括在本实验中。

将图3和图4对比,可以发现,对于同样的气体和同样的点火距离 $L$ ,较小管径的管道中火焰传播速度也较小。例如在 $L=6m$ 处,同样的闭端点火条件下, $\phi 50mm$ 管道中火焰速度为 $52m/s$ ,而 $\phi 100mm$ 管道中火焰速度为 $130m/s$ ,两者相差1.5倍。这是一个非常重要的实验现象,一般说来,它同管道内壁面与火焰面(化学反应区)之间的热效应有密切关系。管径越小,壁面热传导对于火焰传播的影响也越大。当管径小到某个极限值以下时,火焰将发生淬熄<sup>[6]</sup>。

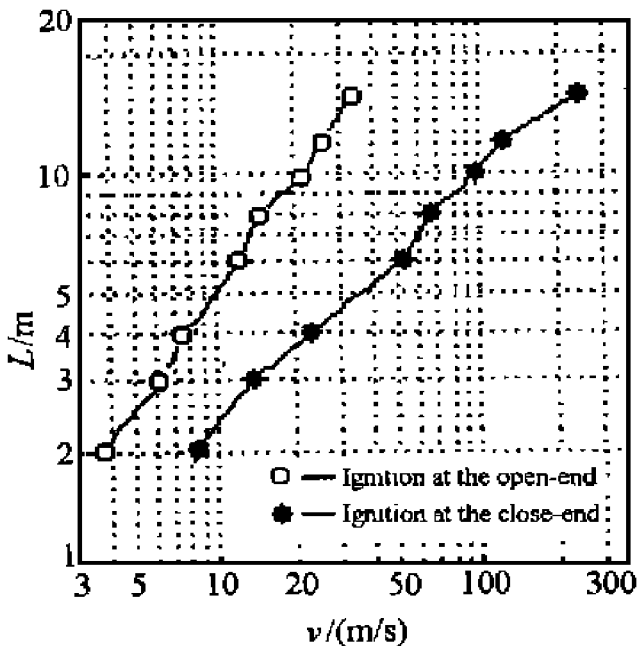


图3 内径50mm管中火焰速度与点火距离的关系  
Fig.3 Flame velocity versus igniting distance in 50mm inner diameter tube

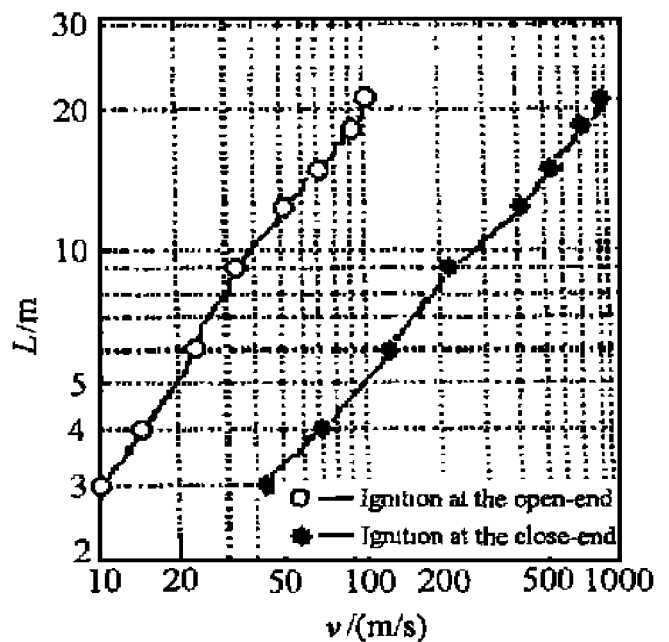


图4 内径100mm管中火焰速度与点火距离的关系  
Fig.4 Flame velocity versus igniting distance in 100mm inner diameter tube

### 3.2 点火能量对火焰加速度的影响

这里的点火能量是指点燃可燃预混气的电火花引爆器中所储存的电能量,也称为名义点火能量,因为每一次引爆过程并不能将所储存的电能量全部释放出来。当改变点火能量时,在 $\phi 100mm$ 管道中实验所得到的火焰速度分布如图5所示。从该图可以看出点火能量从 $3.2J$ 增加到 $32J$ 时,在点火距离 $L=1.5m$ 的测点上火焰速度由 $17m/s$ 增加到 $50m/s$ ,几乎增大了3倍。但是在点火距离为 $18m$ 的测点上火焰速度由 $580m/s$ 增加到 $830m/s$ ,增大了43%。可见点火能量对火焰加速度有一定程度的影响,靠近点火端处影响较大,点火距离 $L > 20m$ 时影响较小。由于本实验设备条件所限,点火能量的改变量还不够大,如果继续增大点火能量,则这种影响将随之增大。我们在较短的管道中

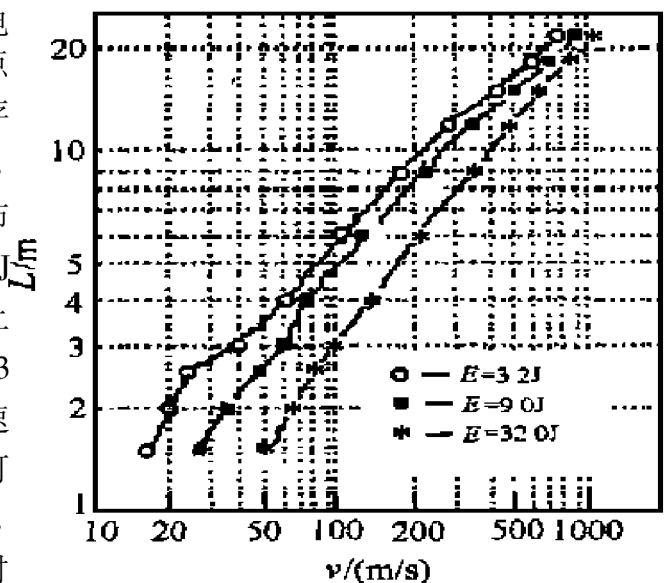


图5 点火能量对火焰加速度的影响  
Fig.5 The influence of ignition energy on flame acceleration

作气体爆轰实验时,在引爆段与试验段之间用聚酯薄膜隔开,在引爆段中充入乙炔-氧气或氢气-氧气等高能量的混合气。点燃引爆段的气体后,在引爆段中很快就形成了较强的爆轰波并将聚酯薄膜冲破,这个爆轰波在试验段中经过短暂的调整即达到稳定爆轰也就是 C-J 爆轰状态。在这个过程中,引爆段就起到了大能量的冲击波点火作用。

### 3.3 管内有障碍物时对火焰加速度的影响

为了观察管内有障碍物时火焰加速度的变化情况,我们参考了 Lee 等<sup>[7]</sup>的工作,在  $\phi 100\text{mm}$  管中设置了环形铁片状的障碍物,圆环外径略小于  $100\text{mm}$ ,内径为  $80\text{mm}$ ,厚度为  $5\text{mm}$ ,每个环之间用 3 根  $\phi 6\text{mm}$  钢筋相连接,如图 6 所示,我们称之为火焰加速环。加速环的总长度  $S$  及每个环之间的距离  $d$  改变时所获得的火焰加速度是不同的。我们作了 4 种结构的实验,即:(1)5 个圆环,间距  $d=250\text{mm}$ ; (2)5 个圆环,间距  $d=125\text{mm}$ ; (3)9 个圆环,间距  $d=250\text{mm}$ ; (4)9 个圆环,间距  $d=125\text{mm}$ 。

实验介质仍然是  $4.03\%$  的丙烷-空气预混气。闭端点火,点火能量为  $9.0\text{J}$ 。测速点设在距点火处  $6\text{m}$  和  $12\text{m}$  处。表 1 给出了这 4 组实验的结果。表中的火焰速度是多次实验数据的平均值。

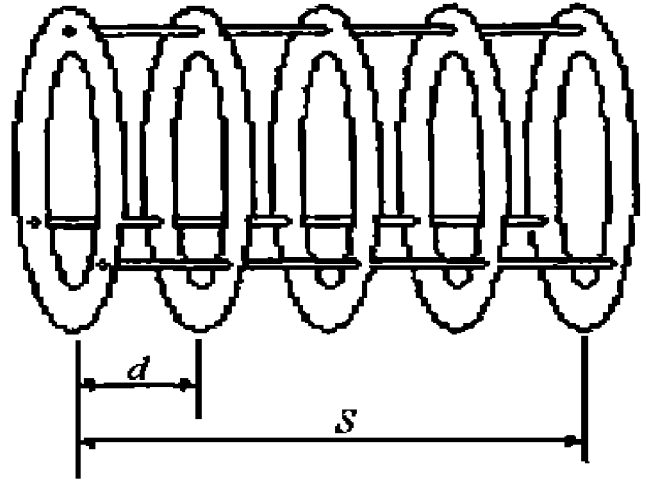


图 6 火焰加速环示意图

Fig.6 Schematic diagram of repeated annular obstacles

表 1 在  $\phi 100\text{mm}$  管道中设置加速环时的火焰速度

Table 1 Flame velocity in  $\phi 100\text{mm}$  tube

| 实验序号 | 加速环个数 | 加速环间距<br>$d/\text{mm}$ | 障碍物总长度<br>$S/\text{mm}$ | 6m 测点<br>火焰平均速度<br>$v/(\text{m/s})$ | 12m 测点<br>火焰平均速度<br>$v/(\text{m/s})$ |
|------|-------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1    | 5     | 250                    | 1000                    | 491                                 | 695                                  |
| 2    | 5     | 125                    | 500                     | 542                                 | 770                                  |
| 3    | 9     | 250                    | 2000                    | 885                                 | 1030                                 |
| 4    | 9     | 125                    | 1000                    | 903                                 | 1150                                 |

从(1)、(3)组实验或(2)、(4)组实验对比看,当加速环间距  $d$  不变,而加速环个数增加或障碍物(加速环)总长度  $S$  增加时,火焰加速度显然增大了。在  $12\text{m}$  测点上,火焰速度  $v$  增大了将近  $50\%$ 。从(1)、(4)组实验对比看,当加速环个数由 5 个增加到 9 个,环间距  $d$  由  $250\text{mm}$  减小到  $125\text{mm}$ ,但障碍物(加速环)总长度  $S$  不变,在  $12\text{m}$  测点上火焰速度增大了  $65\%$ 。如果将(1)、(2)组或(3)、(4)组实验加以对比来看,即加速环的个数不变,仅仅加速环间距  $d$  减小(当然障碍物总长度  $S$  要减小),则无论是在  $6\text{m}$  测点上还是在  $12\text{m}$  测点上,火焰速度仅略有增加,其增加量最大不超过  $12\%$ 。这个结果说明,管道内障碍物对火焰加速度的影响主要取决于加速环个数,而环间距  $d$  的影响居次要地位。

如果将表 1 的结果与 3.1 节中所给出的具有光滑内壁管道中的实验结果图 4 相比较,则可以发现当管内有障碍物时火焰加速度的增量非常惊人。例如图 4 中在同样的闭端点火条件

下,在12m测点上,火焰速度仅为415m/s;而表1中的12m测点上火焰速度为695m/s到1150m/s。也就是说当管内有障碍物(加速环)时,火焰速度增加了67%~177%。如果进一步增加加速环的个数,亦即增加障碍物的总长度 $S$ ,火焰速度有可能继续增大。对于这个结果, Lee等的解释是由于管内障碍物的作用,使原来管中的层流火焰转变成湍流火焰,造成了火焰的突然加速。这不仅给我们提供了一个在较短的管道中获得较大火焰速度的方法,同时也使我们有理由相信,一个内壁产生腐蚀或被污垢污染并有大量凸起物附着在内表面的管道,将会比一个具有光滑内壁的管道产生更大的火焰加速度。这对于工业上输送可燃气体的管道网而言,无疑是一个尚未加以考虑的安全隐患。因为按照目前关于管道阻火器的设计、制造、检测和安装使用的准则,都仅仅取决于火焰加速段的长度,而这个长度一般是根据火焰在光滑内壁管道中的实验结果来确定的。因此,尽管所选用的管道阻火器是完全符合国家标准规定的合格产品,也仍然有可能失去其阻火效能,从而对工业设备安全构成潜在的威胁。

#### 4 结 论

(1)在内壁光滑或近似於光滑的直管道中,闭端点火比开端点火可以获得更大的爆燃火焰加速度。

(2)无论开端还是闭端点火条件下,在 $\phi 50\text{mm}$ 和 $\phi 100\text{mm}$ 直管道中,点火距离为3~20m(工业上常用)的范围内,爆燃火焰速度分布曲线在双对数坐标中呈线性特征。

(3)在内壁光滑或近似於光滑的直管道中,较大直径的管道所产生的火焰加速度也较大。我们所给出的实验结果可供工业应用时参考。

(4)点火能量的有限改变仅对初期传播的气体爆燃火焰加速度有较大影响。

(5)管道内有障碍物时,将明显增大爆燃火焰的加速度。根据这一结果,应重新考虑工业管道阻火器的设计和安装使用的安全标准。

#### 参考文献:

- [1] Flame Arresters for General Use, BS7244. British Standards Institution [S]. London: BSI, 1990.
- [2] 石油气体管道阻火器阻火性能和试验方法, GB13347-92. 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [3] Watson P B. Flame Arresters Instrumentation and Safety in the Oil and Natural Gas Industries Conference [M]. Glasgow, UK, 1977.
- [4] Roussakis N, Lapp K. A Comprehensive Test Method for Inline Flame Arresters [J]. Plant Operations Progress, 1991, 10: 85~92.
- [5] Rogowski Z W. Manual for Testing Flame Arresters [M]. Borehamwood, UK: Crown Copyright, 1987.
- [6] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃火焰通过平行板狭缝时的淬熄研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 111~118.
- [7] Lee J H, Knystautus R, Chan C K. Turbulent Flame Propagation in Obstacle-filled Tubes [A]. 20th Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh: the Combustion Institute, 1984. 663~671.

## Flame Front Acceleration of Propane-air Deflagration in Straight Tubes

ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen

*(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

**Abstract:** The propagating characteristics of deflagration flame in propane-air mixtures in straight tubes were studied experimentally using an array of repeated annular obstacles in a 100mm inner diameter tube. The parameters studied include the velocity of deflagration flame in smooth bore tube, the influence of nominal ignition energy on flame acceleration and the generation of high flame velocity. Based on the results, the validity and safety of flame arresters with conventional design and installation in tubes are under question.

**Key words:** propane; deflagration flame; acceleration; flame arresters; industrial safety